

DOSIS DEBIDO A LA INCORPORACIÓN POR INGESTIÓN DE EMISORES BETA PUROS^a

DOSES DUE TO INCORPORATION BY INGESTION OF BETA EMITTERS

JUAN OCAMPO^b, ANSELMO PUERTA^b, JAVIER MORALES^b

Recibido 07-03-2016, aceptado 31-05-2016, versión final 07-06-2016.

Artículo Investigación

RESUMEN: El cálculo de dosis debido a la incorporación de radionúclidos se realiza en función de los coeficientes de dosis equivalente comprometida $h(50)$ y dosis efectiva comprometida $e(50)$. En este trabajo se calculan estos coeficientes de dosis para la ingestión única de 3H , ${}^{14}C$, ${}^{32}P$, ${}^{35}S$ utilizando los valores de las fracciones de absorción específicas (SAF) del phantom computacional masculino de referencia de la ICRP (International Commission on Radiological Protection). Se usó además el modelo del tracto alimentario humano, HATM, para la determinación del número total de desintegraciones (Us) y la metodología de cálculo de las nuevas recomendaciones del ICRP dadas en la publicación 103. En general se encontró que los coeficientes de dosis equivalente comprometida para la mayoría de órganos presentan relativamente pocas diferencias, con excepción de algunos órganos como las paredes del estómago, el colon y la vejiga, además se encontró que existen diferencias significativas en las dosis de la médula ósea (RBM) y la superficie ósea (BS) para el caso particular del ${}^{32}P$.

PALABRAS CLAVE: Dosimetría interna, fracciones de absorción específicas, simulador computacional.

ABSTRACT: Dose calculation due to the incorporation of radionuclides is performed using the committed equivalent dose coefficients $h(50)$ and the committed effective dose coefficient $e(50)$. In this work we evaluated the dose coefficients for single ingestion of 3H , ${}^{14}C$, ${}^{32}P$, ${}^{35}S$ using the values of the specific absorbed fraction (SAF) from the male reference computational phantom of the ICRP (International Commission on Radiological Protection). We used the human alimentary tract model, HATM, for determining the total number of nuclear disintegrations (Us) and the ICRP 103 methodology was followed. In general was found that the committed equivalent dose coefficients for most of the organs have relatively few differences, except for some organs such as the walls of the stomach, colon and bladder, also was found that there are significant differences in the doses in red bone marrow (RBM) and the bone surface (BS) for the particular case of ingestion of ${}^{32}P$.

KEYWORDS: Internal dosimetry, specific absorbed fraction, computational phantoms.

^aOcampo, J., Puerta, A. & Morales, J. (2016). Dosis debido a la incorporación por ingestión de emisores beta puros. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (1), 98-110. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.56085>

^bEscuela de Física, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

jcocampor@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversos escenarios en los cuales hay riesgo de incorporación de materiales radioactivos y en consecuencia es necesario aplicar técnicas de dosimetría interna, estos están diferenciados por el tipo de condición particular. La incorporación por parte de los trabajadores ocupacionalmente expuestos se puede dar durante cualquier instante de su rutina de trabajo diario. Para miembros del público se debe a la presencia de radioactividad en los alimentos, aguas de consumo y en aire que es inhalado, por lo que la incorporación se presenta constantemente. Otro caso particular se da en Medicina nuclear, en donde los pacientes incorporan una actividad fija de ciertos radionúclidos con fines de diagnóstico o tratamiento de enfermedades.

La evaluación de la dosis producto de exposiciones internas, habitualmente se calcula, en base a la estimación, la actividad incorporada y el empleo de coeficientes de dosis equivalente comprometida y dosis efectiva comprometida. Estos factores de dosis tienen en cuenta los modelos biocinéticos y dosimétricos de cada radionúclido específico. Si bien se han realizado muchas actualizaciones y avances en dosimetría interna la estructura metodológica del cálculo de dosis se sigue realizando con los formalismos establecidos en la publicación 30 del ICRP (ICRP, 1979).

El propósito de este trabajo es mostrar los resultados de coeficientes de dosis comprometida, para la ingestión única de 3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S los cuales fueron obtenidos empleando tanto nuevos modelos biocinéticos, como nuevos modelos dosimétricos propuestos por la ICRP. Estos radionúclidos se caracterizan por ser emisores beta puros, tener un esquema de decaimiento simple (ICRP, 2008) y distribuirse homogéneamente en todos los tejidos y órganos del cuerpo humano, por lo cual las dosis en la mayoría de órganos son similares, exceptuando los órganos del sistema digestivo y la vejiga (IAEA, 1999).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelos dosimétricos

Se define la fracción de absorción específica (SAF, Specific Absortion Fraction) como la fracción de energía emitida por un órgano fuente que es absorbida por un órgano blanco por unidad de masa del órgano blanco, para una desintegración dada con una energía determinada (ICRP, 1979), es decir:

$$SAF(T \leftarrow S) = \frac{AF(T \leftarrow S)}{M_T} \quad (1)$$

donde la fracción de absorción (AF) es la energía absorbida en un órgano blanco T por emisión de radiación R en un órgano fuente S.

Para el cálculo de los valores de AF y SAF es necesario utilizar procedimientos numéricos y también es necesario la definición de un hombre de referencia anatómico, el cual representa la morfología y anatomía promedio de una población de estudio, el hombre de referencia empleado por el ICRP está basado en datos anatómicos del hombre caucásico. Los cálculos de los valores de SAF para los emisores beta considerados, se realizaron utilizando el phantom computacional de referencia masculino (RCP-AM), de la publicación 110 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) (ICRP, 2009) y el código de transporte MCNPX (Pelowitz, 2005).

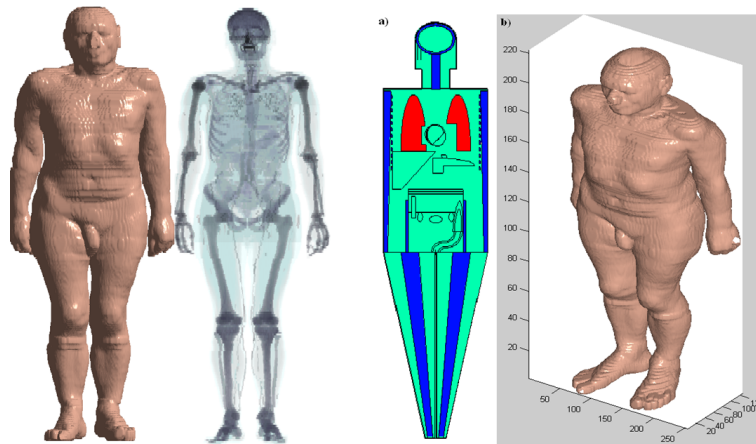


Figura 1: (Izquierda) Representación del RCP-AM (Derecha) Comparación de los Phantom de referencia masculino, a) Modelo tipo ORNL o estilizado, b) Modelo voxelizado. (Ocampo, 2012). Fuente: Elaboración propia

En la simulación de Monte Carlo se consideró como fuente el contenido de órganos con paredes: boca, esófago, estómago, intestino delgado, colon derecho, colon izquierdo, colon sigmoideo y vejiga. Dado que los radionúclidos en cuestión se distribuyen homogéneamente por todos los órganos y tejidos del cuerpo, el órgano fuente principal es el cuerpo entero, es decir, todos los órganos del cuerpo menos el contenido de los órganos con paredes. La simulación se realizó para electrones monoenergéticos de energías de 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 4 y 6 MeV, los cuales fueron generados homogéneamente e isotrópicamente desde cada uno de los órganos fuente, se tuvo en cuenta el transporte de los fotones secundarios, el número de historias simuladas fue de 10 millones y se calculó la energía depositada por los electrones y fotones en 28 órganos blanco de interés dosimétrico. La deposición de energía se registró usando el “tally f8” y las energías de corte para fotones y electrones fueron tomados por defecto.

Como un caso particular se tiene el ^{32}P , el cual una vez absorbido, parte de él se deposita en la estructura ósea, específicamente en: el hueso trabecular superficial (TBS) y en el hueso cortical superficial (CBS). Esto hace que sea necesario considerar estos tejidos como órganos fuente y para el caso particular de las combinaciones: SAF(RBM←TBS), SAF(BS←TBS), SAF(RBM←CBS), SAF(BS←CBS), que no se pueden calcular directamente por el método de Monte Carlo y la uti-

lización de phantoms voxelizados (dada la poca resolución) se utilizaron los datos publicados por Matthew Hough (Hough *et al.*, 2011).

Para emisores beta y cuando, la fuente es el cuerpo entero, la publicación 30 de la ICRP (ICRP, 1979) propone el cálculo de la fracción de absorción así:

$$AF(T \leftarrow S) = \frac{M_T}{M_{WB}}, \text{ si } S = WB \quad (2)$$

donde M_T es la masa del órgano blanco y M_{WB} es la masa del cuerpo entero.

Para órganos con paredes, la fracción de absorción específica se calcula así (ICRP, 1979):

$$SAF(Pared \leftarrow Contenido) = \frac{1}{2M_{cont}} \nu \quad (3)$$

donde M_{cont} es la masa del contenido y ν es un factor entre 0 y 1 que representa el grado con el cual la radiación penetra hasta las células en riesgo; ν es tomado como 1 para partículas beta. Los resultados de las simulaciones Monte Carlo son comparados con los resultados obtenidos de las ecuaciones 2 y 3.

2.2. Modelos Biocinéticos

El modelo de incorporación usado fue el del Tracto Alimentario Humano, HATM, propuesto por la ICRP en la publicación 100 (ICRP, 2006), éste es un modelo mucho más detallado que el modelo previo del tracto gastrointestinal (TGI). Cuando la incorporación es por ingestión, la entrada de un radionúclido se da por la vía oral, pasando por la cavidad bucal, luego al esófago, donde es transferido al estómago por dos componentes, uno que representan la transferencia rápida de la mayoría del material ingerido, esófago (rápido) y otra la transferencia lenta del material residual, esófago (lento) cuyas fracciones por defecto se asumen del 90 % y 10 % respectivamente. Además, este modelo divide el intestino grueso en tres regiones: colon derecho, colon izquierdo y colon sigmoideo, estas regiones han sido reconocidas e identificadas en estudios de tránsito intestinal. Cada valor de los parámetros de este modelo está representado por coeficientes de transferencia que describen la velocidad de salida de una sustancia desde un compartimiento y están disponibles en la publicación.

Los modelos biocinéticos fueron simulados a través de estructuras compartimentales, donde el coeficiente de transferencia entre ellos involucra tanto el decaimiento biológico como el decaimiento radioactivo. El conjunto de compartimientos es descrito por un sistema de ecuaciones diferenciales, las cuales fueron resueltas usando el método de autovalores y autovectores implementado en MATLAB (MATLAB, 2000).

2.3. Coeficientes de dosis

Para el cálculo de coeficientes de dosis equivalente comprometida se utilizó la ecuación 4, mientras que para el cómputo de los coeficientes de dosis efectiva comprometida (Ecuación 5) se utilizó los factores de peso por tejido y la metodología descrita en las recomendaciones del ICRP 103 (ICRP, 2007).

$$h_T(50) = 1,6 \times 10^{-10} \sum_S \left[U_S \left(\sum_1 Y_1 E_1 \frac{AF(T \leftarrow S)_1 W_{R1}}{M_T} \right) \right] (S_V/B_q) \quad (4)$$

$$e(50) = \sum_T w_t h(50) \quad (5)$$

3. RESULTADOS

Los resultados se presentan teniendo en cuenta que para el 3H , ${}^{14}C$ y ${}^{35}S$ tienen modelos biocinéticos simples en los cuales el radionúclido se distribuye homogéneamente sobre todos los órganos del cuerpo, por otra parte se presenta el ${}^{32}P$ en el cual existe retención en la estructura ósea. De los resultados obtenidos con Monte Carlo un 86% de todos los datos presentan un error relativo menor de 0.05 y el 94% de todos los datos de SAF presentaron un error relativo menor de 0.1, lo cual es un valor de confianza aceptable para la simulación con MCNP. En los casos en los cuales el error relativo fue mayor a 0.15 el valor fue descartado, es decir, SAF=0.

3.1. Coeficientes de dosis para 3H , ${}^{14}C$ y ${}^{35}S$

Los valores de dosis equivalente comprometida, $h_t(50)$, fueron calculados a partir de la Ecuación 4, las siguientes tablas resumen los resultados encontrados (denotados como calculados), además se realiza una comparación con los coeficientes actuales tomados del software AIDE (Activities and Internal Dose Estimates) versión 6 (Bertelli *et al.*, 2008).

Tabla 1: Valores de h_T (Sv/Bq) para la ingestión única de Tritio, según tipo de compuesto

Tipo de Compuesto	HTO			OBT		
	Órgano	Calculado	AIDE	Relación	Calculado	AIDE
Glándulas suprarrenales	1.73E-11	1.81E-11	0.95	3.89E-11	4.09E-11	0.95
Cerebro	1.73E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Mama	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Paredes del colon	1.74E-11	1.99E-11	0.87	3.92E-11	4.09E-11	0.96
ET1	1.79E-11	1.81E-11	0.99	4.03E-11	4.27E-11	0.94
ET2	1.73E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Nódulos linfáticos ET	1.65E-11	1.81E-11	0.91	3.72E-11	4.09E-11	0.91
Lente	1.97E-11	-	-	4.44E-11	-	-
Vesícula biliar	1.73E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Paredes del corazón	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.92E-11	4.09E-11	0.96
Riñones	1.73E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Hígado	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.92E-11	4.09E-11	0.96
Pulmones	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.92E-11	4.09E-11	0.96
Nódulos linfáticos	1.72E-11	1.81E-11	0.95	3.88E-11	4.09E-11	0.95
Músculo	1.73E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Esófago	1.75E-11	1.81E-11	0.97	3.94E-11	4.09E-11	0.96
Mucosa oral	1.72E-11	-	-	3.90E-11	-	-
Gónadas	1.87E-11	1.81E-11	1.03	4.22E-11	4.09E-11	1.03
Páncreas	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.92E-11	4.09E-11	0.96
Glándulas salivares	1.75E-11	-	-	3.94E-11	-	-
Piel	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.91E-11	4.09E-11	0.96
Paredes del intestino	1.74E-11	1.83E-11	0.95	3.93E-11	4.11E-11	0.96
Bazo	1.75E-11	1.81E-11	0.97	3.94E-11	4.09E-11	0.96
Paredes del estomago	1.73E-11	2.47E-11	0.70	3.89E-11	4.74E-11	0.82
Timo	1.75E-11	1.81E-11	0.97	3.95E-11	4.09E-11	0.97
Tiroides	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.93E-11	4.09E-11	0.96
Paredes de la vejiga	1.75E-11	1.81E-11	0.96	3.93E-11	4.09E-11	0.96
Próstata	1.77E-11	1.81E-11	0.98	4.00E-11	4.09E-11	0.98
Médula ósea	1.74E-11	1.81E-11	0.96	3.92E-11	4.09E-11	0.96

Tabla 2: Valores de h_T (Sv/Bq) para la ingestión única de ^{14}C por parte del hombre adulto

Órgano	Calculado	AIDE	Relación
Glándulas suprarrenales	5.44E-10	5.71E-10	0.95
Cerebro	5.47E-10	5.71E-10	0.96
Mama	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Paredes del colon	5.48E-10	5.87E-10	0.93
ET1	5.64E-10	5.71E-10	0.99
ET2	5.46E-10	5.71E-10	0.96
Nódulos linfáticos ET	5.24E-10	5.71E-10	0.92
Lente	6.28E-10	-	-
Vesícula biliar	5.44E-10	5.71E-10	0.95
Paredes del corazón	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Riñones	5.47E-10	5.71E-10	0.96
Hígado	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Pulmones	5.49E-10	5.71E-10	0.96
Nódulos linfáticos	5.44E-10	5.71E-10	0.95
Músculo	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Esófago	5.50E-10	5.71E-10	0.96
Mucosa oral	5.45E-10	-	-
Gónadas	5.41E-10	5.71E-10	0.95
Páncreas	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Glándulas salivares	5.51E-10	-	-
Piel	5.46E-10	5.71E-10	0.96
Paredes del intestino	5.49E-10	5.72E-10	0.96
Bazo	5.52E-10	5.71E-10	0.97
Paredes del estomago	5.44E-10	6.28E-10	0.87
Timo	5.53E-10	5.71E-10	0.97
Tiroides	5.50E-10	5.71E-10	0.96
Paredes de la vejiga	5.49E-10	5.71E-10	0.96
Próstata	5.60E-10	5.71E-10	0.98
Médula ósea	5.48E-10	5.71E-10	0.96
Superficie ósea	5.48E-10	5.71E-10	0.96

Tabla 3: Valores de h_T (Sv/Bq) para la ingestión única de ^{35}S por parte del hombre adulto según tipo de compuesto.

Tipo de Compuesto	S-inorgánico			S-orgánico		
	Calculado	AIDE	Relación	Calculado	AIDE	Relación
Órgano						
Glándulas suprarrenales	9.12E-11	9.60E-11	0.95	7.16E-10	7.55E-10	0.95
Cerebro	9.17E-11	9.60E-11	0.96	7.21E-10	7.55E-10	0.95
Mama	9.18E-11	9.60E-11	0.96	7.22E-10	7.55E-10	0.96
Paredes del colon	9.24E-11	2.60E-10	0.36	7.23E-10	8.29E-10	0.87
ET1	9.45E-11	9.60E-11	0.98	7.43E-10	7.55E-10	0.98
ET2	9.16E-11	9.60E-11	0.95	7.20E-10	7.55E-10	0.95
Nódulos linfáticos ET	8.78E-11	9.60E-11	0.92	6.90E-10	7.55E-10	0.91
Lente	1.05E-10	-	-	8.27E-10	-	-
Vesícula biliar	9.13E-11	9.60E-11	0.95	7.18E-10	7.55E-10	0.95
Paredes del corazón	9.19E-11	9.60E-11	0.96	7.22E-10	7.55E-10	0.96
Riñones	9.18E-11	9.60E-11	0.96	7.21E-10	7.55E-10	0.96
Hígado	9.19E-11	9.60E-11	0.96	7.22E-10	7.55E-10	0.96
Pulmones	9.21E-11	9.60E-11	0.96	7.24E-10	7.55E-10	0.96
Nódulos linfáticos	9.13E-11	9.60E-11	0.95	7.17E-10	7.55E-10	0.95
Músculo	9.19E-11	9.60E-11	0.96	7.22E-10	7.55E-10	0.96
Esófago	9.38E-11	9.60E-11	0.98	7.24E-10	7.55E-10	0.96
Mucosa oral	9.36E-11	-	-	7.18E-10	-	-
Gónadas	9.07E-11	9.60E-11	0.94	7.12E-10	7.55E-10	0.94
Páncreas	9.20E-11	9.60E-11	0.96	7.23E-10	7.55E-10	0.96
Glándulas salivares	9.25E-11	-	-	7.27E-10	-	-
Piel	9.15E-11	9.60E-11	0.95	7.19E-10	7.55E-10	0.95
Paredes del intestino	9.22E-11	9.80E-11	0.94	7.24E-10	7.56E-10	0.96
Bazo	9.26E-11	9.60E-11	0.96	7.28E-10	7.55E-10	0.96
Paredes del estómago	9.14E-11	1.50E-10	0.61	7.17E-10	8.11E-10	0.88
Timo	9.27E-11	9.60E-11	0.97	7.29E-10	7.55E-10	0.97
Tiroides	9.23E-11	9.60E-11	0.96	7.26E-10	7.55E-10	0.96
Paredes de la vejiga	9.26E-11	2.90E-10	0.32	7.24E-10	8.35E-10	0.87
Próstata	9.40E-11	9.60E-11	0.98	7.38E-10	7.55E-10	0.98
Médula ósea	9.20E-11	9.60E-11	0.96	7.23E-10	7.55E-10	0.96
Superficie ósea	9.20E-11	9.60E-11	0.96	7.23E-10	7.55E-10	0.96

En general, las dosis equivalentes comprometidas presentan poca variación para la mayoría de los órganos, esto está dado porque los resultados de SAF(T ← Cuerpo entero) con el phantom voxelizado RCP-AM son muy cercanos a los calculados con el modelo estilizado del ORNL. Como ejemplo de lo anterior se muestra las figuras 2(a) y 2b, donde claramente se nota que para estos tipos de combinación, los valores SAF son independientes de la energía inicial de los electrones y presentan un valor muy cercano a la aproximación dada en el ICRP 30 (Ecuación 2). Sin embargo, cuando el

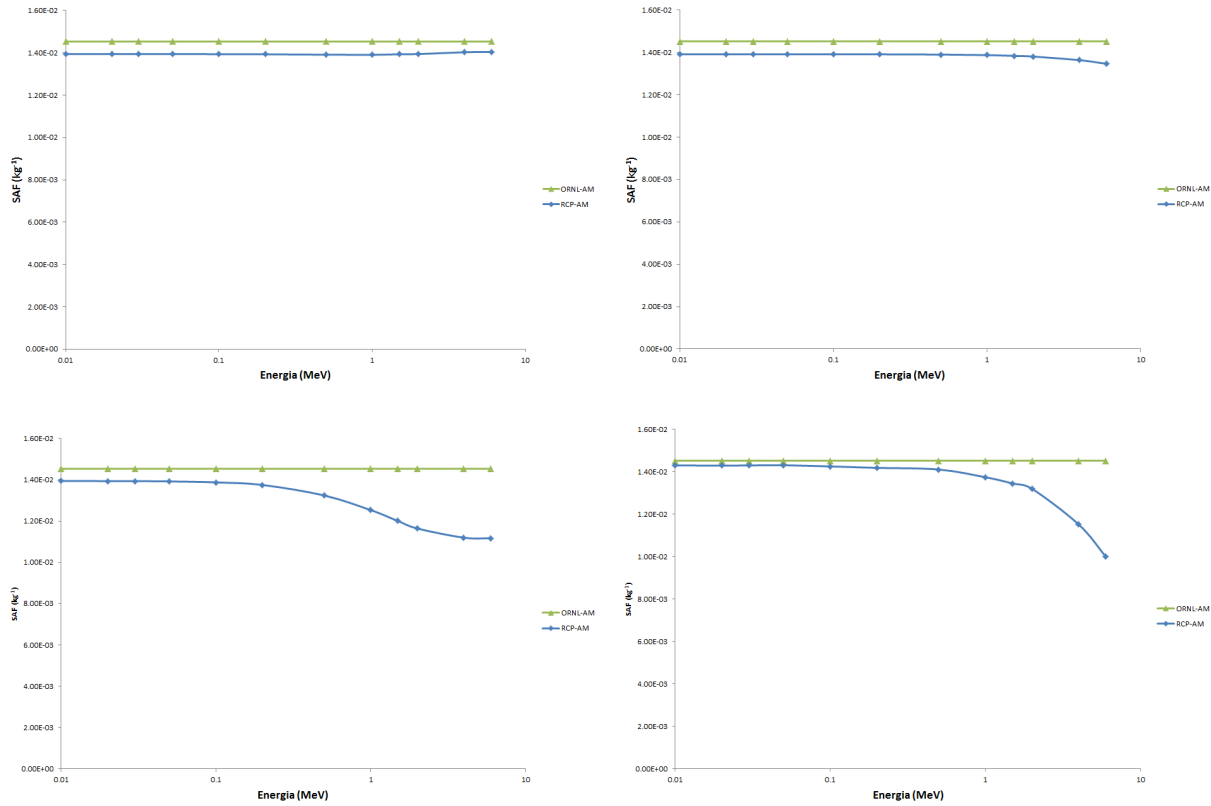


Figura 2: a) Valores de SAF(pulmones ← cuerpo entero), b) Valores de SAF(hígado ← cuerpo entero), c) Valores de SAF(paredes del colon ← cuerpo entero), d) Valores de SAF(ET1 ← cuerpo entero). Fuente: Elaboración propia

órgano blanco se encuentra ubicado en la periferia del cuerpo o se trata de órganos con paredes, la fracción de absorción si depende de la energía y las diferencias respecto a las simplificaciones del ICRP 30 son significativas (ver Figura 2(c) y 2(d)).

Las mayores diferencias entre los coeficientes de dosis calculados en este trabajo respecto a los valores de referencia se encontraron para los órganos con paredes. Es importante resaltar que si bien el modelo del HATM, establece que el tejido radio sensible para este tipo de órganos y para radiación no penetrante son las células blanco y no las paredes, como fue calculado en este trabajo y como se determina de acuerdo al modelo dosimétrico de la publicación 30 del ICRP. Este trabajo pretende precisamente contrastar esta diferencia y se pretende a futuro realizar un análisis más elaborado con los valores de AF y SAF del modelo del HATM.

Al evaluar las SAF para los órganos con paredes se encontró lo siguiente: Para los SAF(Paredes ← Contenido) de cada respectivo órgano, se encontraron grandes diferencias. La Ecuación 3 es una aproximación que lleva a una sobreestimación de las dosis en las paredes del órgano fuente. Las

DOSIS DEBIDO A LA INCORPORACIÓN POR INGESTIÓN DE EMISORES BETA PUROS

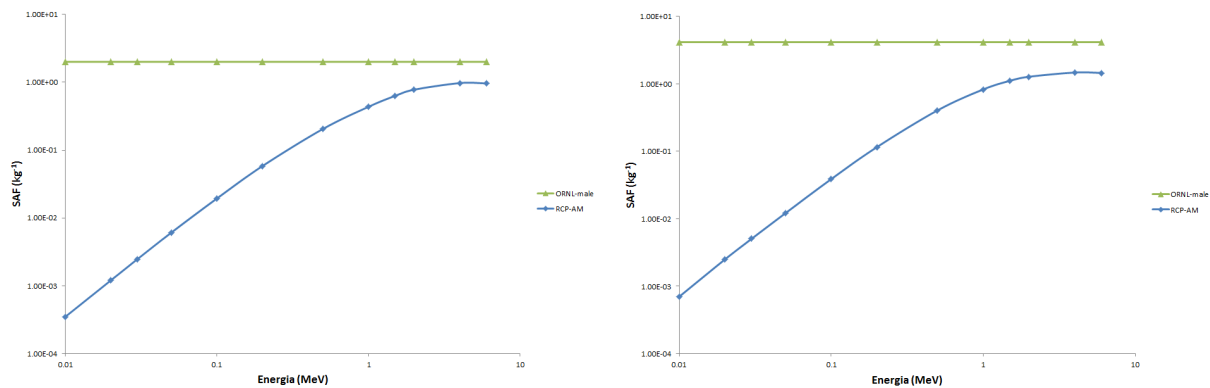


Figura 3: a) SAF(paredes del estómago ← contenido del estómago), b) SAF(paredes de la vejiga ← contenido de la vejiga). Fuente: Elaboración propia

figuras 2(a) y 2(b) muestran a modo de ejemplo lo que ocurre con el estómago y la vejiga, siendo las diferencias de cuatro órdenes de magnitud para bajas energías y a partir 1 MeV bajan a un orden de magnitud, pero siguen siendo significativas.

3.2. Coeficientes de dosis para ^{32}P

El análisis de las diferencias encontradas en los coeficientes de dosis para el 3H , ^{14}C y ^{35}S también es aplicable para el ^{32}P , pero teniendo presente que como éste se deposita en la estructura ósea, es de esperarse un cambio significativo en la dosis recibida en médula ósea y la superficie ósea. La Tabla 4 muestra exactamente esto, además, debe tenerse presente que hay una diferencia significativa entre las masas de la RBM y BS del phantom voxelizado del ICRP y del phantom estilizado del ORNL.

3.3. Coeficientes de dosis efectiva comprometida e(50)

En cuanto a los coeficientes de dosis efectiva comprometida los resultados se muestran en la Tabla 5, en donde el valor de referencia está calculado con: el modelo estilizado del ORNL (valores de SAF), el ICRP 60 (factores de peso w_t), el ICRP 30 (TGI) e ICRP 38 (Energías y rendimientos). Dado que la dosis resultante en todos los órganos es homogénea los resultados de e(50) presentaron diferencias por debajo del 8% para el HTO, OBT, ^{14}C y ^{35}S orgánico. La gran discrepancia de e(50) que se presenta para el ^{35}S inorgánico se debe a la diferencia de la dosis absorbida por las paredes del colon y el estómago, las cuales son mucho menores en los datos calculados. El valor de e(50) encontrado para el caso del ^{32}P resulta ser más bajo que el calculado en la publicación 30 del ICRP, esto se debe a que: primero, para el colon y el estómago que tienen valor de peso específico, el cálculo del SAF con el modelo voxelizado es dependiente de la energía y en consecuencia resulta ser menor que el determinado con el modelo del ICRP 30. Segundo la diferencia en el caso de la médula ósea se debe a no solamente a cambios en las masas de referencia, sino además, a los cambios en

los valores de AF reportados por Matthew Hough (Hough *et al.*, 2011).

Tabla 4: Valores de h_T (Sv/Bq) para la ingestión única de ^{32}P por parte del hombre.

Órgano	Calculado	AIDE	Relación
Glándulas suprarrenales	6.40E-10	6.71E-10	0.95
Cerebro	6.88E-10	6.71E-10	1.03
Mama	6.37E-10	6.71E-10	0.95
Paredes del colon	1.32E-09	5.57E-09	0.24
ET1	6.66E-10	6.71E-10	0.99
ET2	6.83E-10	6.71E-10	1.02
Nódulos linfáticos ET	8.03E-10	6.71E-10	1.20
Lente	6.56E-10	-	-
Vesícula biliar	5.42E-10	6.71E-10	0.81
Paredes del corazón	6.44E-10	6.71E-10	0.96
Riñones	6.40E-10	6.71E-10	0.95
Hígado	6.55E-10	6.71E-10	0.98
Pulmones	6.77E-10	6.71E-10	1.01
Nódulos linfáticos	6.61E-10	6.71E-10	0.99
Músculo	6.65E-10	6.71E-10	0.99
Esófago	6.66E-10	6.71E-10	0.99
Mucosa oral	7.60E-10	-	-
Gónadas	6.30E-10	6.71E-10	0.94
Páncreas	6.42E-10	6.71E-10	0.96
Glándulas salivares	6.48E-10	-	-
Piel	5.48E-10	6.71E-10	0.82
Paredes del intestino	6.61E-10	1.07E-09	0.62
Bazo	6.48E-10	6.71E-10	0.97
Paredes del estómago	7.32E-10	1.47E-09	0.50
Timo	6.58E-10	6.71E-10	0.98
Tiroides	6.46E-10	6.71E-10	0.96
Paredes de la vejiga	7.13E-10	1.71E-09	0.42
Próstata	6.57E-10	6.71E-10	0.98
Médula ósea	5.30E-09	8.22E-09	0.65
Superficie ósea	6.05E-09	8.22E-09	0.74

Tabla 5: Coeficientes de dosis efectiva comprometida $e(50)$ (Sv/Bq) para ingestión.

Material Radiactivo	Calculado	Valor de referencia	Relación
3H HTO	1.75E-11	1.80E-11	0.97
3H OBT	3.94E-11	4.20E-11	0.94
^{14}C	5.47E-10	5.80E-10	0.94
^{35}S inorgánico	9.20E-11	1.30E-10	0.71
^{35}S orgánico	7.21E-10	7.80E-10	0.92
^{32}P	1.36E-09	2.39E-09	0.57

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo evidenciar la alta dependencia de los coeficientes de dosis respecto a los modelos dosimétricos, donde la fracción de absorción específica juega el papel principal. Para los modelos biocinéticos de ingestión del 3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S el efecto de utilizar el HATM respecto al TGI es poco en el cálculo del U_s en todos los órganos del modelo de ingestión exceptuando el estómago y el colon, resultados similares a estos han sido encontrados para otros radionúclidos como el ^{90}Sr (Puerta *et al.*, 2011) y el ^{238}U (Ocampo *et al.*, 2012).

Cuando todo el cuerpo es la fuente de electrones se encontró poca variación de los valores calculados de $h(50)$, respecto a la aproximación del ICRP, presentándose leves diferencias asociadas solo a cambios en las masas de referencia de los órganos blanco. Lo cual lleva a inferir que para radionúclidos emisores beta que se distribuyen en todo el cuerpo no se esperaría un cambio significativo en los coeficientes de dosis, excepto para órganos con paredes. Las diferencias significativas se presentaron para el ^{32}P , que incluye el sistema óseo en su modelo sistémico, esto se debe a cambios en las masas de los modelos de referencia y en la actualización de los valores de las fracciones de absorción para regiones fuente/blanco intra-esqueléticas.

A futuro se pretende realizar una comparación entre los coeficientes de dosis para los órganos del HATM utilizando las fracciones de absorción calculadas con la deposición de energía en las células blanco con respecto a la calculada en las paredes. Así mismo se está trabajando en propuestas de coeficientes de dosis para la incorporación de diferentes materiales radiactivos.

Se evidencia que el cambio de la metodología propuesta por el ICRP 103 respecto al ICRP 60 conlleva un valor diferente para la dosis efectiva comprometida. En general, se encontró una tendencia a sobreestimar los cálculos de dosis con las anteriores metodologías.

Referencias

- Bertelli, L., Melo, D. R., Lipsztein, J. & Cruz-Suarez, R. (2008). AIDE: internal dosimetry software. *Radiation Protection Dosimetry*, 130 (3).
- Hough, M., Johnson, P., Rajon, D., Jokisch, D., Lee, C. & Bolch, W. (2011). An imagebased skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources. *Physics in medicine and biology*, 56(8), 2309.
- IAEA. (1999). Assessment of doses to the public from ingested radionuclides, International Atomic Energy Agency Safety Reports Series No. 14.
- ICRP, (1979). Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. *ICRP Publication 30 (Part 1)*. *Ann. ICRP*, 2(3-4).
- ICRP, (2006). Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. *ICRP Publication 100*. *Ann. ICRP*, 36(1-2).
- ICRP, (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103*. *Ann. ICRP*, 37(2-4).
- ICRP, (2008). Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. *ICRP Publication 107*. *Ann. ICRP* 38(3).
- ICRP, (2009). Adult Reference Computational Phantoms. *ICRP Publication 110*. *Ann. ICRP*, 39(2).
- MATLAB 6.1. (2000). The MathWorks Inc. *Natick, MA*.
- Ocampo, J. C. (2012). Determinación de factores de dosimetría interna debido a la ingestión e inhalación de materiales radioactivos. *Master thesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*.
- Ocampo, J. C., Puerta Ortiz, J. A. & Morales Aramburo, J. (2012). Fracciones de retención y excreción del uranio usando el modelo del tracto alimentario humano (ICRP 100). *Revista Colombiana de Física*, 44(1), 10.
- Pelowitz, D. B. (2005). MCNPXTM user's manual. Los Alamos National Laboratory.
- Puerta, J. A., Peña, V. & Morales, J. (2011). Determinación Del Coeficiente De Dosis Efectiva Comprometida Usando El Modelo De HATM ICRP 100 Aplicando El Modelo Sistémico Del 90Sr. *Revista Colombiana de Física*, 42(3), 280.